

SIMULACION DE TERREMOTOS POR ROTURA DE FALLA USANDO EL METODO DE LOS ELEMENTOS DE CONTORNO.

Juan José BENITO MUÑOZ

Universidad Nacional de Educación a Distancia. E.T.S.I.I.

Madrid. España.

Ramón ALVAREZ CABAL ; Enrique ALARCON ALVAREZ

Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I.I.

Madrid. España.

RESUMEN

En lo que sigue se presenta un método para la simulación de terremotos, basado en la modelización conjunta de la fuente del sismo, emplazamiento de la estructura y trayectoria intermedia. Esta aproximación tiene la ventaja, respecto a los métodos clásicos, de hacer innecesarias muchas de las hipótesis obligadas en estos, fundamentalmente en lo que respecta al tipo y características del tren de ondas incidente.

Por otra parte, al englobar la fuente en la discretización se facilita la cuantificación del terremoto, según las ideas más actuales (basadas precisamente en las características físicas de la falla).

Naturalmente, el método presenta una parte negativa obvia: la complejidad y extensión del sistema a modelizar. Es por ello que el método de los elementos de contorno, al discretizar tan sólo el contorno, parece la elección adecuada.

La comunicación se centra en la formulación del método, -poniendo de relieve la facilidad con que la aproximación se incluye en un programa usual de ordenador como una simple subrutina más.

1. INTRODUCCION

Uno de los temas básicos de la ingeniería sísmica es la adecuada definición de la excitación, esto es, del movimiento de campo libre en el emplazamiento de la estructura.

Su importancia radica en que de tal definición se deriva no solamente la carga actuante, sino, en muchos casos, la propia modelización del sistema.

La aproximación clásica parte del análisis de los registros de movimiento en superficie. El tratamiento estadístico de estos datos permite definir la excitación (normalmente en forma de espectro de respuesta).

Aparentemente el método resulta simple y económico, pero presenta en cambio algunas limitaciones importantes.

Una alternativa a esta formulación clásica consiste en la modelización conjunta de la fuente del terremoto (normalmente rotura de falla), el emplazamiento de la estructura y el medio entre ambos.

El atractivo de esta aproximación radica no sólo en obviar los problemas mencionados, sino en seguir las más actuales tendencias en cuanto a la cuantificación del terremoto, basadas en las características de la falla. Por desgracia, la modelización de un sistema tan amplio y complejo no resulta sencilla.

El método de los elementos de contorno parece especialmente indicado en casos como este, dado que, al discretizar únicamente el contorno genera en general, sistemas de tamaño menor al que se obtendría con otros métodos.

En lo que sigue se trata de mostrar la facilidad con que esta aproximación puede ser incluida en un programa de elementos de contorno.

2. SIMULACION DE TERREMOTOS

La definición clásica de la excitación sísmica consiste - en la formulación del espectro de respuesta en un punto de control situado en la superficie del emplazamiento.

Esta idea resulta adecuada para los análisis sísmicos más elementales, en donde se admite la hipótesis de base rígida.

Para estructuras de mayor responsabilidad se justifica el análisis del sistema completo suelo-estructura, cuya formulación exige, como primer paso, definir el movimiento de campo libre. Como tal se entiende el movimiento de todos los puntos del semiespacio en el entorno del futuro emplazamiento.

De todos estos puntos únicamente aquellos que estarán en contacto con la cimentación constituyen directamente la excitación del sistema, ya que su movimiento permitirá la formulación del vector de cargas equivalentes. No obstante, y dada la fuerte no-linealidad de las características mecánicas del suelo, es necesario conocer el movimiento de todos los demás puntos del semiespacio si se desea representar con un mínimo de verosimilitud su comportamiento dinámico.

Este punto de vista obliga a la formulación de hipótesis de gran alcance cuyo análisis resulta complejo y costoso.

Tales hipótesis cubren, fundamentalmente, dos aspectos:

En primer lugar, resulta evidente que, para obtener el movimiento de todos los puntos del semiespacio, es necesario conocer el desplazamiento de todo el contorno, y no únicamente - del punto de control.

Desde un punto de vista práctico, el problema se resuelve suponiendo el terremoto generado por un tren de ondas cuyos parámetros básicos (tipo y dirección) se especifican.

Por otra parte, como el movimiento del punto de control no se suele dar en forma explícita, sino a través del espectro de respuesta que genera, es necesario suponer un registro artificial compatible con tal espectro. Se entiende aquí por compatible el hecho de proporcionar valores de respuesta superiores al de diseño en todo el rango de frecuencias.

Desde hace ya algunos años se han desarrollado diversas técnicas destinadas a simular terremotos compatibles. Basadas en algoritmos numéricos de elevado coste computacional constituyen hoy día un aspecto claramente definido del análisis sísmico.

Si, por último, se piensa en la ya mencionada no-linealidad de las características mecánicas del suelo, se comprende la complejidad e importancia del problema.

3. EL METODO DE LOS ELEMENTOS DE CONTORNO

El Método de los Elementos de Contorno es muy adecuado para la resolución de problemas que implican medios infinitos o semi-infinitos como es el caso de suelos. La formulación del método en elastodinámica fue desarrollada por Cruse y Rizzo en 1968, habiéndose estudiado desde entonces numerosas aplicaciones empleando la transformada de Laplace, la transformada de Fourier o trabajando en el dominio del tiempo.

En nuestro caso, el punto de partida es la ecuación de Navier a la que se aplica la transformada de Fourier para trabajar en el dominio de la frecuencia,

$$(C_p^2 - C_s^2) \bar{u}_{i,ij}(x, \omega) + C_s^2 \bar{u}_{j,ii}(x, \omega) - K^2 \bar{u}_j(x, \omega) + \bar{f}_i(x, \omega) = 0 \quad (1)$$

en la que K es $i\omega$; C_p y C_s son respectivamente la velocidad de las ondas p y s ; $\bar{f}(x, \omega)$ y $\bar{u}(x, \omega)$ son las transformadas de Fourier de las fuerzas de masa y del campo de desplazamientos.

Si sobre una región regular R , se consideran dos estados elastodinámicos, siendo el primero el sistema real y considerando como fuerza excitadora del segundo una carga armónica unidad de frecuencia ω aplicada en un punto " y " en dirección i , la aplicación del teorema de reciprocidad proporciona una caracterización del medio mediante la ecuación integral:

$$\begin{aligned} \bar{u}_i(y, \omega) + \int_{\partial R} \left[\bar{u}_j(x, \omega) \bar{T}_{ij}(y, x, \omega) \right] ds = \\ = \int_{\partial R} \left[\bar{t}_j(x, \omega) \bar{U}_{ij}(y, x, \omega) \right] ds + \int_R \left[\bar{X}(x, \omega) \bar{U}_{ij}(y, x, \omega) \right] dv \quad (2) \end{aligned}$$

en la que \bar{X} son las fuerzas de volumen y donde los núcleos \bar{U}_{ij} y \bar{T}_{ij} , que corresponden a la solución fundamental de la ecuación de Navier, representan los desplazamientos y tensiones en un punto " x " en dirección " j ", cuando se aplica una carga armónica unidad en un punto " y " en dirección " i ".

SOLUCION FUNDAMENTAL

La solución fundamental para el caso tridimensional dentro del campo de la elasticidad dinámica en régimen estacionario ante sollicitaciones de tipo armónico, es la indicada a continuación, pudiéndose encontrar su obtención en las referencias.

$$\bar{u}_j(y, \omega) = \bar{U}_{ij}(y, x, \omega) e_i \quad (3)$$

Siendo:

$$\bar{U}_{ij} = \frac{1}{4\pi\rho C_s^2} (\bar{\psi} \delta_{ij} - \bar{X} r_{,i} r_{,j}) \quad (4)$$

$$\bar{X} = \left(\frac{3C_s^2}{K^2 r^2} + \frac{3C_s}{Kr} + 1 \right) \frac{e}{r} - \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^2 \left(\frac{3C_p^2}{K^2 r^2} + \frac{3C_p}{Kr} + 1 \right) \frac{e}{r} - \frac{Kr}{C_p} \quad (5)$$

$$\bar{\psi} = \left(\frac{c_s^2}{K^2 r^2} + \frac{c_s}{Kr} + 1 \right) \frac{e}{r} - \left(\frac{c_s}{c_p} \right)^2 \left(\frac{c_p^2}{K^2 r^2} + \frac{c_p}{Kr} \right) \frac{e}{r} - \frac{Kr}{c_s} - \frac{Kr}{c_p} \quad (6)$$

$$\bar{t}_j(y, \omega) = \bar{T}_{ij}(y, x, \omega) e_i \quad (7)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ij} = \frac{1}{4\pi} & \left[\left(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial r} - \frac{1}{r} \bar{X} \right) (\delta_{ij} \frac{\partial r}{\partial n} + r_{,j} n_i) - \right. \\ & - \frac{2\bar{X}}{r} (n_j r_{,i} - 2r_{,i} r_{,j} \frac{\partial r}{\partial n}) - 2 \frac{\partial \bar{X}}{\partial r} r_{,i} r_{,j} \frac{\partial r}{\partial n} + \\ & \left. + \left(\frac{c_p^2}{c_s^2} - 2 \right) \left(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial r} - \frac{\partial \bar{X}}{\partial r} - \frac{2\bar{X}}{r} \right) r_{,i} n_j \right] \quad (8) \end{aligned}$$

y los valores de \bar{X} , $\bar{\psi}$ y K las expresiones anteriores.

Para el caso estático, la solución fundamental es:

$$u_j(y) = U_{ij}(y, x) e_i \quad (9)$$

$$U_{ij} = \frac{1}{16\pi\mu r(1-\nu)} \left[(3-4\nu) \delta_{ij} + r_{,i} r_{,j} \right] \quad (10)$$

$$t_j(y) = T_{ij}(y, x) e_i \quad (11)$$

$$T_{ij} = - \frac{1}{8\pi(1-\nu)r^2} \left[\frac{\partial r}{\partial n} ((1-2\nu) \delta_{ij} + 3r_{,i} r_{,j}) + (1-2\nu) (n_j r_{,j} - n_j r_{,i}) \right] \quad (12)$$

APLICACION DEL M.E.C.

La base de partida del método, la constituye la ecuación integral (2), en la que se suponen nulas las fuerzas de volumen, y que, como puede apreciarse, permite obtener el desplazamiento en cualquier punto "y" del dominio, en función de dos integrales extendidas al contorno.

Para el cálculo de movimientos y esfuerzos en la superficie, se hace tender el punto "y" al contorno. La aparición en este caso de una singularidad (al tender y a x, el valor r tiende a cero), se resuelve mediante un proceso de paso al límite, que proporciona la siguiente relación en el contorno para el caso de superficie lisa:

$$\frac{1}{2} \bar{u}_i + \int_{\partial R} \bar{u}_j \bar{T}_{ij} ds = \int_{\partial R} \bar{t}_j \bar{U}_{ij} ds \quad (13)$$

Debido a que la resolución de esta ecuación integral es extremadamente difícil, se realiza una aproximación numérica a base de discretizar el contorno en elementos.

Las coordenadas de un punto del contorno perteneciente al elemento K (que se representan por X_i^K), se pueden expresar mediante unas funciones de interpolación, $h^n(\xi)$, de las coordenadas de los N nudos que definen el elemento:

$$X_i^K(\xi) = \sum_{n=1}^N h^n(\xi) X_i^n \quad (14)$$

De forma análoga, los valores de las variables de campo en un punto del contorno perteneciente a un elemento K, se pueden expresar en función de sus valores en una serie de nodos sobre el elemento:

$$\bar{u}_i^K(\xi) = \sum_{n=1}^N h^n(\xi) \bar{u}_i^n \quad (15)$$

$$\bar{t}_i^K(\xi) = \sum_{n=1}^N h^n(\xi) \bar{t}_i^n \quad (16)$$

Pudiéndose escoger o no el mismo orden de aproximación para estas últimas y la geometría.

Al sustituir el contorno continuo ∂R por uno discretizado con M elementos ∂R_K , la ecuación integral (13) se transforma en una expresión en sumatorios y planteando las ecuaciones de este tipo para cada nodo, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \bar{u}_i + \sum_{K=1}^M \sum_{n=1}^N \bar{u}_j^n \int_{\partial R_K} \bar{T}_{ij} h^n(\xi) J d\xi_1 d\xi_2 = \\ = \sum_{K=1}^M \sum_{n=1}^N \bar{t}_j^n \int_{\partial R_K} \bar{U}_{ij} h^n(\xi) J d\xi_1 d\xi_2 \end{aligned} \quad (17)$$

en la que J es el jacobiano de la transformación.

La expresión (17) se puede expresar en forma matricial:

$$\underline{C} \underline{u} + \underline{A}^* \underline{u} = \underline{B} \underline{t} \quad (18)$$

siendo:

\underline{u} : el vector de desplazamientos en los nodos del contorno.

\underline{t} : el vector de tensiones en los nodos del contorno.

\underline{A}^* : la matriz de coeficientes integrales de la tensión.

\underline{B} : la matriz de coeficientes integrales de los desplazamientos.

Si se hace:

$$\underline{A} = \underline{C} + \underline{A}^* \quad (19)$$

Se llega al sistema de ecuaciones integrales:

$$\underline{A} \underline{u} = \underline{B} \underline{t} \quad (20)$$

que al imponer las suficientes condiciones de contorno, proporciona un sistema determinado que conduce a la solución. Resuelto el problema en el contorno se puede obtener los desplazamientos en cualquier punto del dominio por aplicación de la ecuación (13).

4. DISCRETIZACION DE SEMIESPACIOS

En este apartado se pasa revista a alguna de las formulaciones del método de los elementos de contorno desarrolladas para los casos de dos dimensiones, axisimétrico y tres dimensiones.

En 2-D, la aplicación más completa es, probablemente, la desarrollada por Abascal [1]. El programa admite un gran número de posibilidades que incrementan su versatilidad. Entre ellas es de destacar muy especialmente la capacidad para modelar subregiones, zonas del espacio de diferentes características mecánicas.

Esta idea resulta especialmente útil para el tratamiento de esquemas de cimentación complejos, no sólo en lo que respecta a la geometría del propio cimiento, sino a las características del suelo en que se apoya.

La subregionalización puede utilizarse también para modelizar el cambio de las propiedades mecánicas del suelo con la profundidad. Para ello basta con dividir el semiespacio en un cierto número de estratos horizontales, cada uno de los cuales mantiene características mecánicas constantes, pero diferentes a los demás.

Las figuras adjuntas tan sólo pretenden dar una idea de las posibilidades del programa en este sentido. La figura 1 representa el perfil de cimentación de un caso concreto. La figura 2 muestra la discretización adoptada.

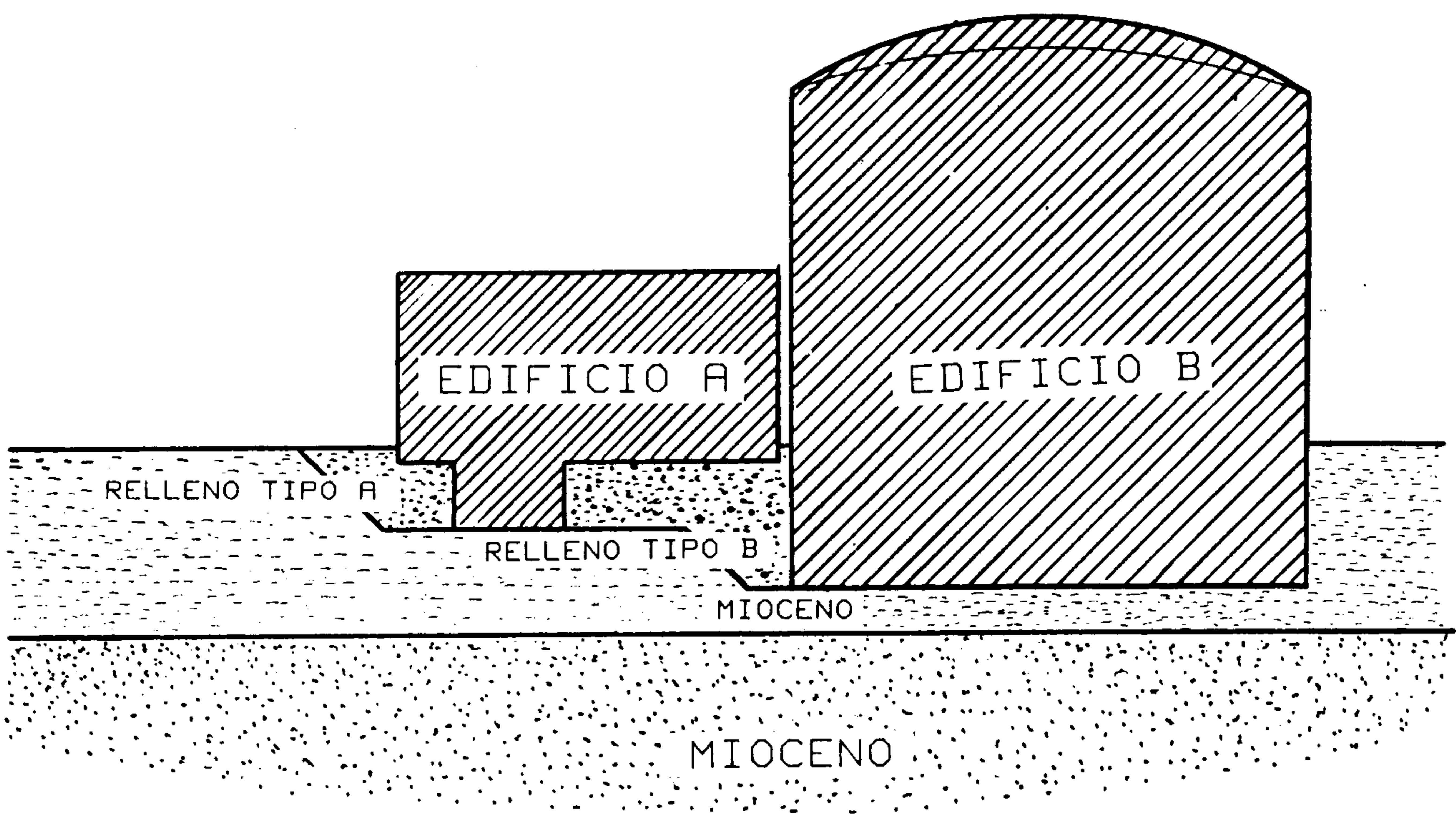


FIGURA 1

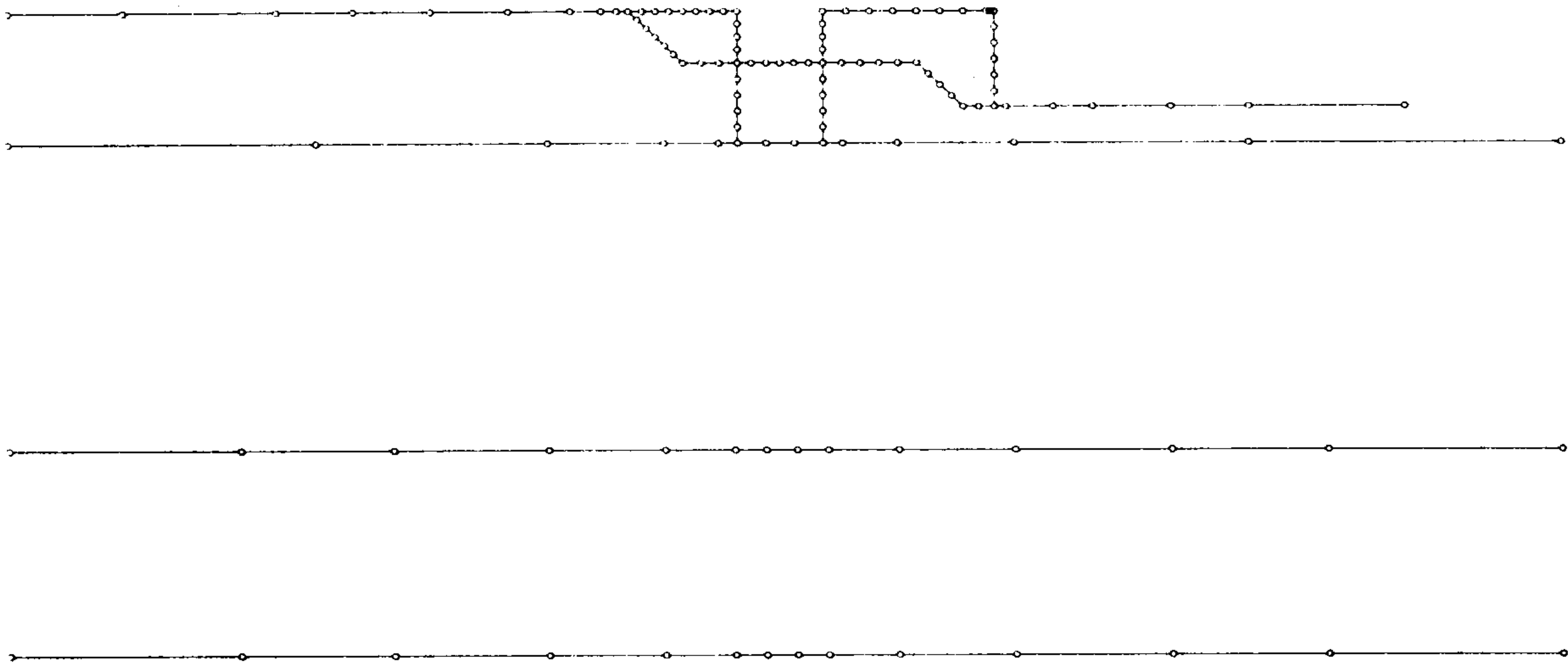


FIGURA 2

Naturalmente, el programa dispone de un gran número de posibilidades en lo que respecta al tipo de elemento, condiciones de simetría, de contorno, y, en general, de todas las técnicas que permiten reducir el tamaño del sistema de ecuaciones. El cuidado puesto en la modelización de estas últimas (condiciones de contorno) permite el tratamiento de distintos tipos de problemas (obtención de impedancias de cimentación, movimiento de campo libre, interacción cinemática...).

Los modelos axisimétricos constituyen una de las aproximaciones clásicas, no ya al problema abordado, sino, en general, a toda la mecánica del suelo.

Dentro de esta formulación, el programa CATES [5] constituye uno de los ejemplos más desarrollados.

Se trata de un programa de elementos de contorno para la modelización de cimentaciones axisimétricas sobre terrenos estratificados con amortiguamiento histerético. Su cualidad fundamental radica en ser capaz de generar en forma automática una malla de elementos de contorno adaptada a la frecuencia de cálculo.

La figura 3 trata precisamente de mostrar esta adaptación de la malla de elementos al caso considerado.

El planteamiento más general, en tres dimensiones, presenta, como es lógico, el problema de dar lugar a sistemas de ecuaciones de elevado coste de resolución (no hay que olvidar que las matrices generadas son, a diferencia del M.E.F. matrices llenas).

Es por ello que en muchas ocasiones es preferible recurrir a hipótesis tendentes a reducir el problema al caso bidimensional o axisimétrico equivalente. Ello es particularmente cierto cuando las formas de la cimentación conservan cierta regularidad. De no ser así, el análisis en tres dimensiones es inevitable.

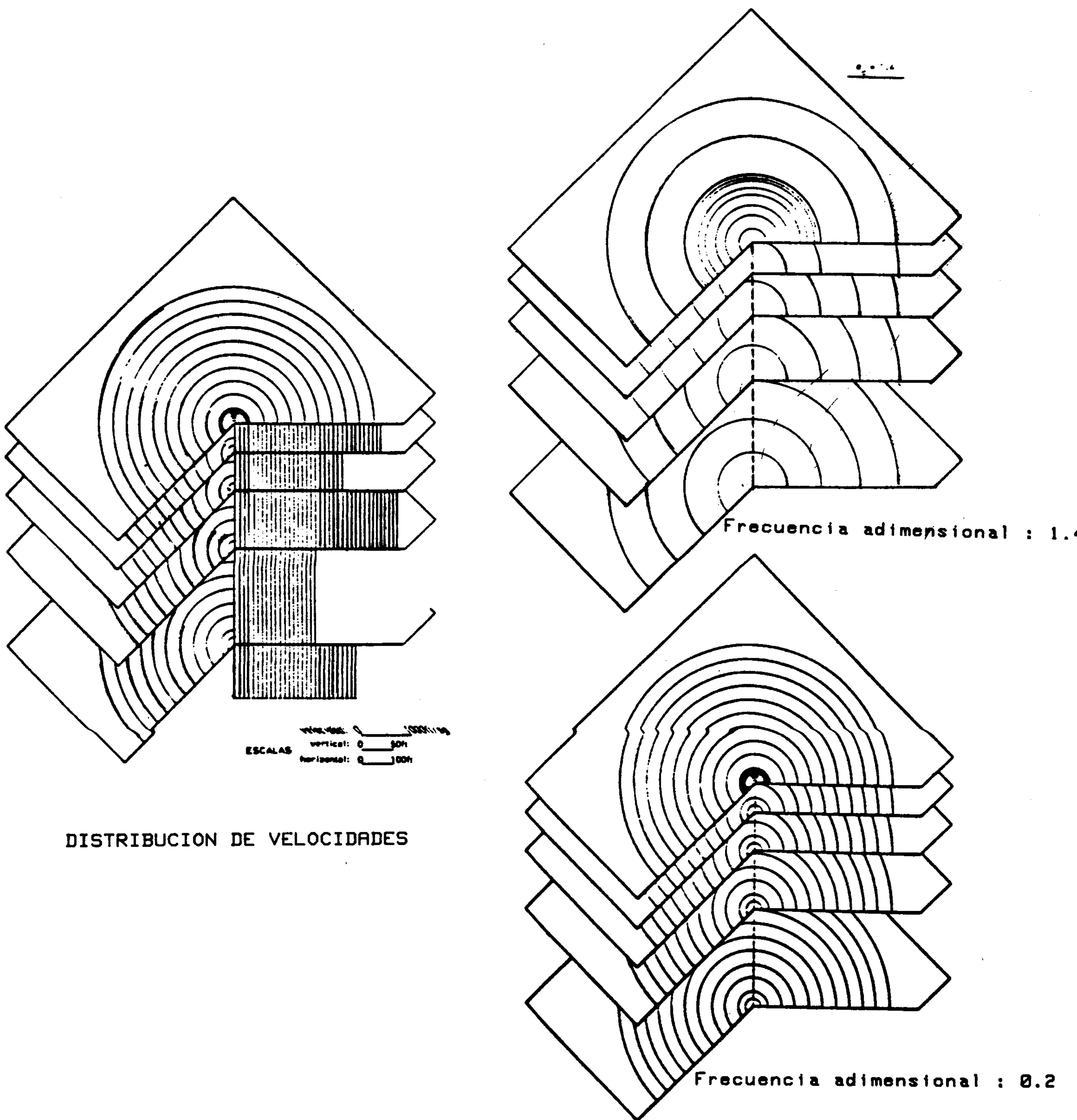


FIGURA 3

El programa TYRME [3] aplica el método de los elementos de contorno en 3-D. Código abierto, dedicado fundamentalmente a investigar los efectos tridimensionales, es la herramienta - ideal para el análisis académico del método aquí presentado.

La figura 4 muestra una discretización empleada en su momento para la comprobación del programa. Se trata de una cimentación superficial circular aproximada mediante elementos -

triangulares.

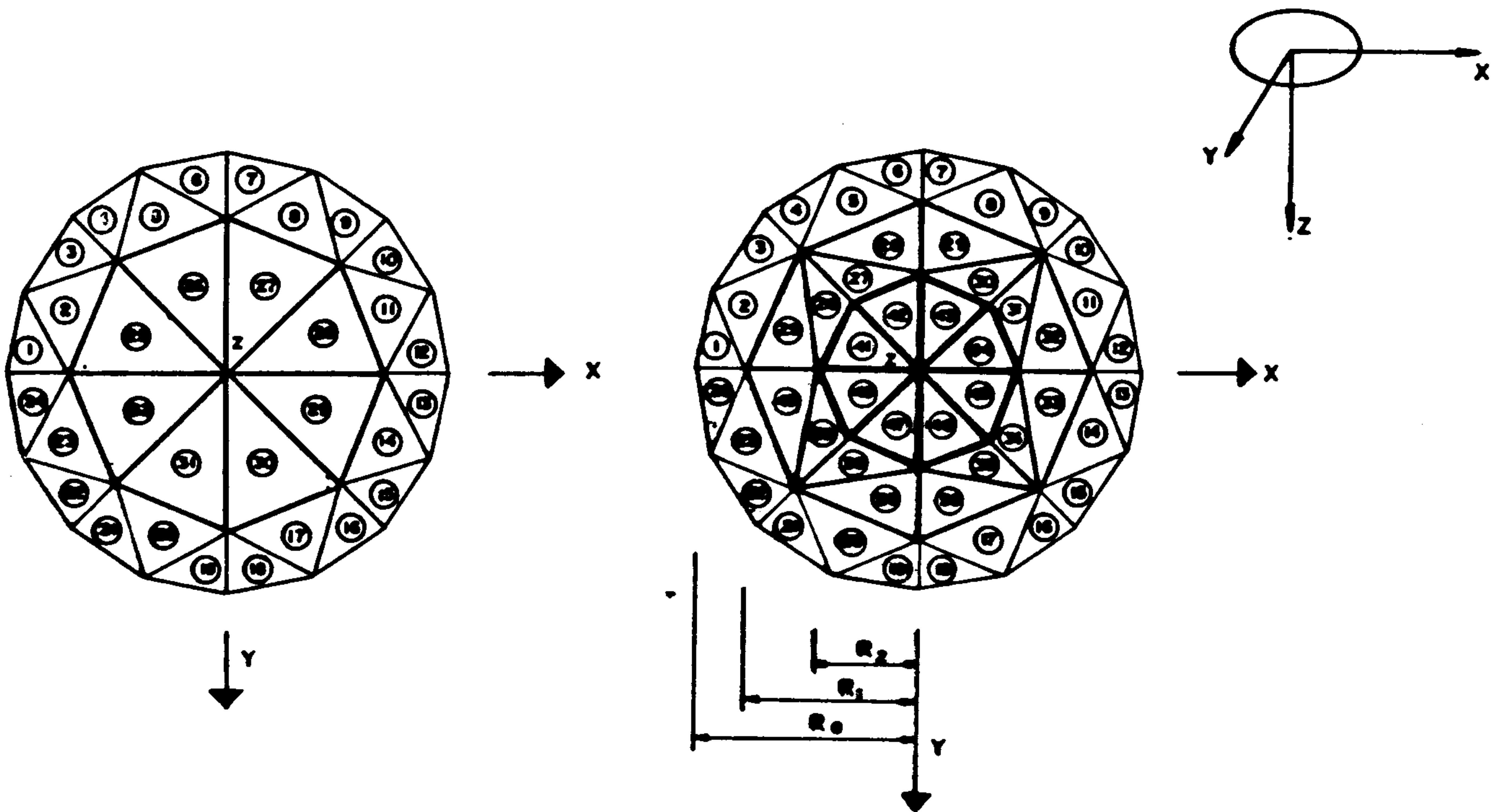


FIGURA 4

5. MODELO DEL FOCO

La interpretación actual de los terremotos está encuadrada en el marco de la tectónica de placas y, salvo casos excepcionales, se relaciona con fenómenos de tipo mecánico en la litosfera. La base es la teoría del rebote elástico de Reid (1912) provocado por la acumulación de energía de deformación en una falla hasta que se produce el deslizamiento brusco de sus lados. Con la introducción de más detalles (asperezas, barreras, etc.) esta idea ha sido la matriz de la espectacular transformación de la sismología hacia una ciencia cuantitativa (Aki 1980) que, apoyado en las posibilidades de cálculo abiertas por el desarrollo del computador, permite hacer predicciones impensables hace unas décadas. El énfasis se ha trasladado así desde el estudio de la estructura de la tierra, basado en análisis de las ondas sísmicas, a las conjeturas sobre los mecanismos focales. En este sentido el problema es muy complicado. Se trata, en efecto, de resolver un problema inverso: detectar en las ondas recibidas en los observatorios trazas de las características de una fractura desarrollada en un medio

altamente no lineal, pretensado, anisótropo y heterogéneo. Se desconoce además la forma del foco que se supone extenso.

En estas condiciones se suelen realizar diferentes hipótesis que tienden a reducir el número de parámetros a identificar, lo que conduce a resultados que deben ser interpretados como promedio. En líneas generales, se supone una falla plana y una forma de rotura simple. Se admite además que los fenómenos de comportamiento material no lineal se encuentran localizados en aquélla de modo que la propagación corresponde a ondas elásticas lineales en un medio heterogéneo (y en general anisótropo). En muchos desarrollos geofísicos la heterogeneidad se supone relativa a un medio estratificado, con estratos radiales u horizontales. Finalmente la forma de la rotura así como su evolución en el tiempo se dan en esquemas sencillos. Los modelos suelen ser de dos tipos, llamados cinemáticos y dinámicos. En los primeros la descripción del terremoto es sustancialmente el deslizamiento en la falla, lo que impide una representación estricta de los fenómenos no lineales en el foco. Los modelos dinámicos especifican, por contra, la caída de tensiones en el foco, utilizando las teorías de mecánica de la fractura. Los primeros modelos desarrollados suponían focos puntuales e introdujeron los conceptos de momento sísmico, direccional, etc. Muy pronto estos modelos fueron completados para tener en cuenta la extensión de la falla (Knopoff (1964); Backus (1976,77), Madariaga (1978,80), etc.). En todos los modelos se supone que tras el desplazamiento de la falla se produce una soldadura de los labios, debido a las altas presiones actuantes y al rozamiento entre las paredes. Es el fenómeno denominado "stick-slip".

La figura 5 recoge uno de los primeros modelos cinemáticos debido a Haskell; en el instante $t=0$ aparece una dislocación finita que se propaga a una velocidad de rotura constante, barriendo una falla rectangular.

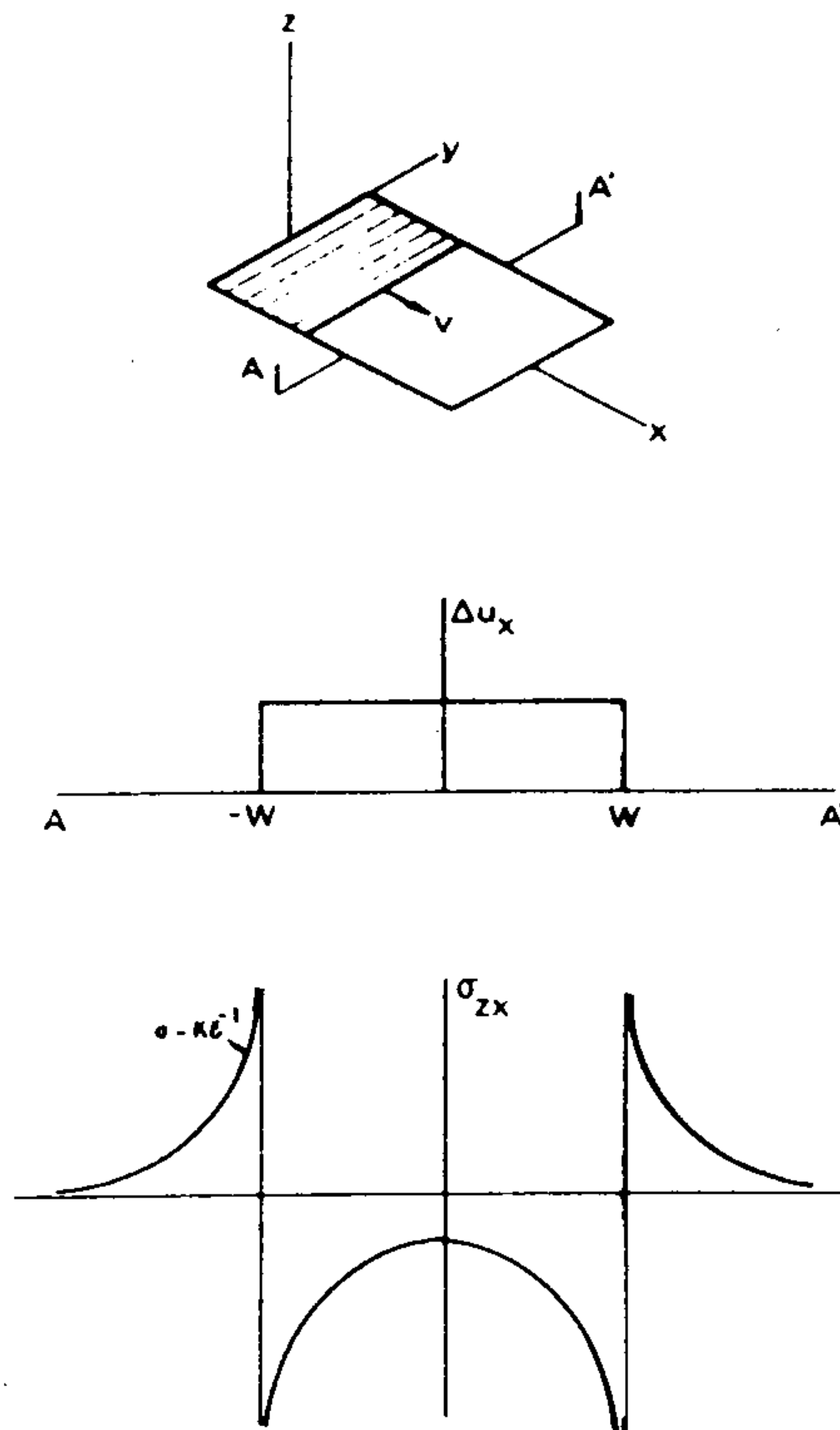


FIGURA 5

Existen 3 parámetros: anchura B ; longitud L ; velocidad θ de rotura y una función de deslizamiento que, en general se modelada mediante una función rampa:

$$D(t) = \left[tH(t) - (t-\tau) H(t-\tau) \right] D_0$$

Esta función añade dos nuevos parámetros: la discontinuidad estática de desplazamiento D_0 y el tiempo de subida τ . El momento sísmico es:

$$M_0 = 2 B L D_0 G$$

donde G es el módulo de rigidez.

Los modelos dinámicos más sencillos son debidos a Madariaga. La figura 6 representa un modelo de fisura circular con una caída de tensiones $\Delta\sigma$ en el interior de la grieta y una concentración de tensiones de orden $-1/2$. Si se supone que $\Delta\sigma$ es constante, la función de deslizamiento es:

$$D(t) = \frac{24}{7L} \frac{\Delta\sigma}{G} \sqrt{(a^2 - r^2)}$$

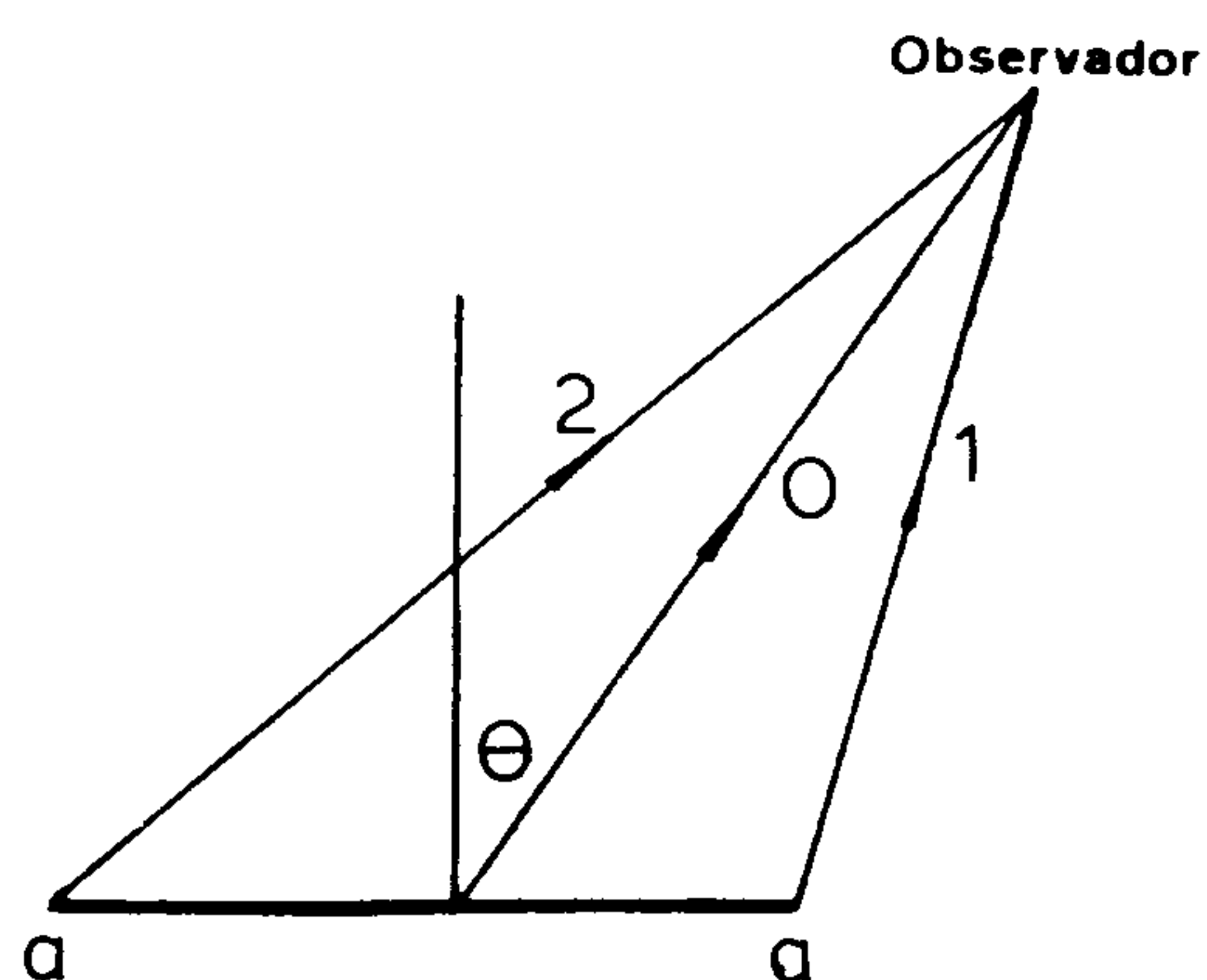
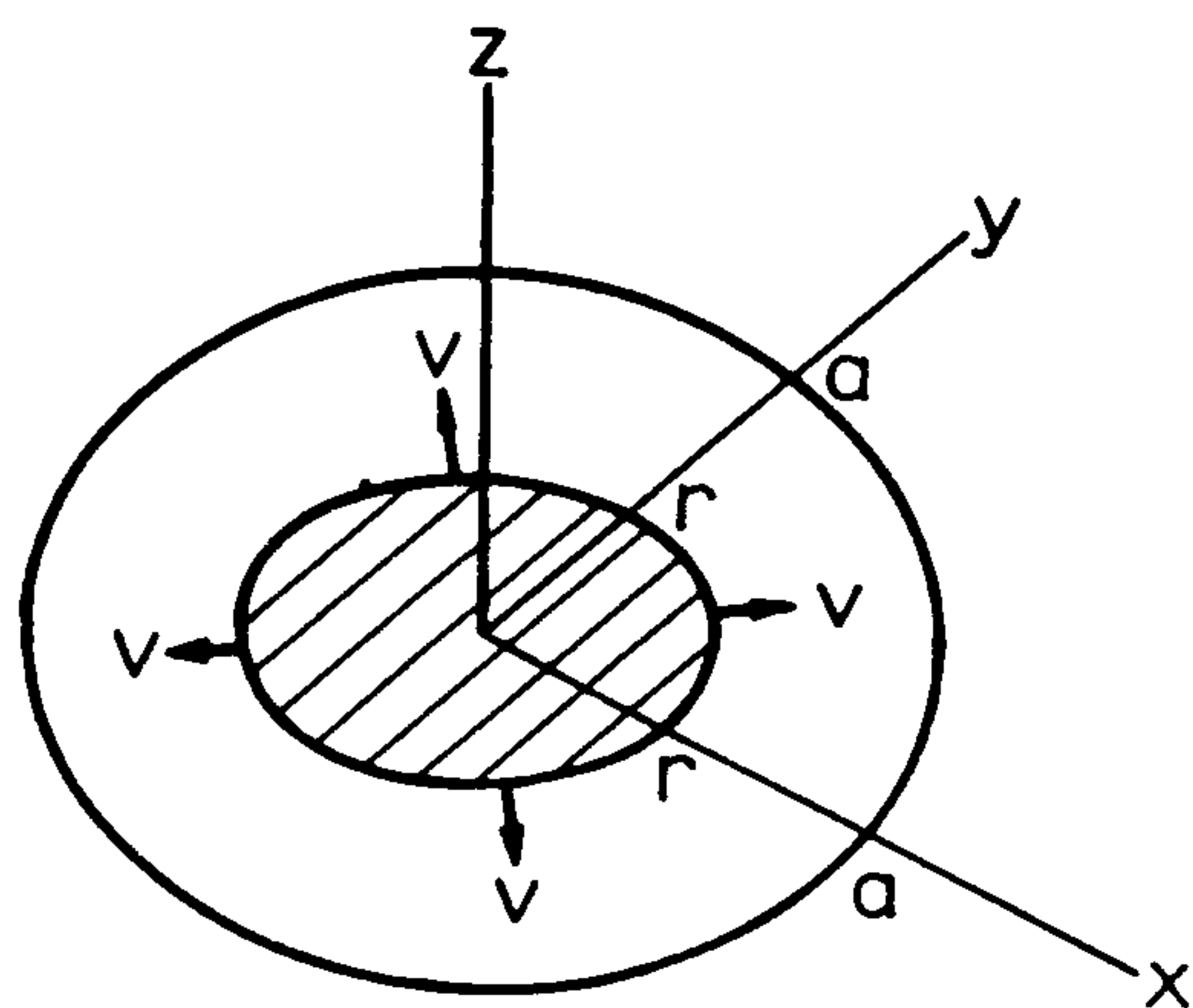


FIGURA 6

donde r es la distancia radial desde el centro de la fisura y a es el radio de la falla. El momento sísmico en este caso es:

$$M_o = \frac{16}{7} a^3 \Delta\sigma$$

En general las caídas de tensión son muy bajas (10-100 bars), y no varían más que en un orden de magnitud para terremotos situados en lugares muy distintos, por lo que el modelo es muy apropiado.

El estudio dinámico de este modelo es sencillo si se supone que la rotura crece simétricamente con una velocidad constante. Según Madariaga:

$$\Delta u(r,t) = \frac{\Delta \sigma}{G} C(v) \sqrt{(v^2 t^2 - r^2)}$$

donde $C(v) \sim 1$, con lo que la forma de la función de deslizamiento es la misma que la de la solución estática.

Las ideas anteriores pueden ser materializadas mediante métodos numéricos, lo que permite la introducción de heterogeneidades con geometría más complicada que el simple modelo estratificado, variaciones en la geometría de la falla y en las propiedades del material, etc.

Uno de los intentos más interesantes con elementos finitos fue propuesto por Archuleta (1980) aunque tropieza con el enorme tamaño de las mallas empleadas y las conocidas dificultades de los contornos artificiales.

El método de los elementos de contorno, por otro lado, no introduce más que una discretización de la superficie libre y las interfaces, lo que lo hace especialmente atractivo para estos problemas y, por ello, será utilizado en lo que sigue. Para simplificar el tratamiento se trabaja en el dominio de la frecuencia, lo que reduce las ecuaciones a la forma estática. Además, ello permite la introducción sencilla de un amortiguamiento material tipo Voigt.

En lo que sigue, nos ocuparemos de la formulación del problema en elementos de contorno.

En el caso de un hueco en el terreno, tal y como se indica en la figura 7-A, la ecuación en el contorno (13) se puede escribir:

$$\begin{aligned} C\bar{u}(P) + \int_{\partial\Omega} \bar{u}(Q)\bar{T}(P,Q)dS_Q + \int_F \bar{u}(Q)\bar{T}(P,Q)dS_Q = \\ = \int_{\partial\Omega} \bar{t}(Q)\bar{U}(P,Q)dS_Q + \int_F \bar{t}(Q)\bar{U}(P,Q)t(Q)dS_Q \end{aligned} \quad (21)$$

siendo F la superficie del hueco.

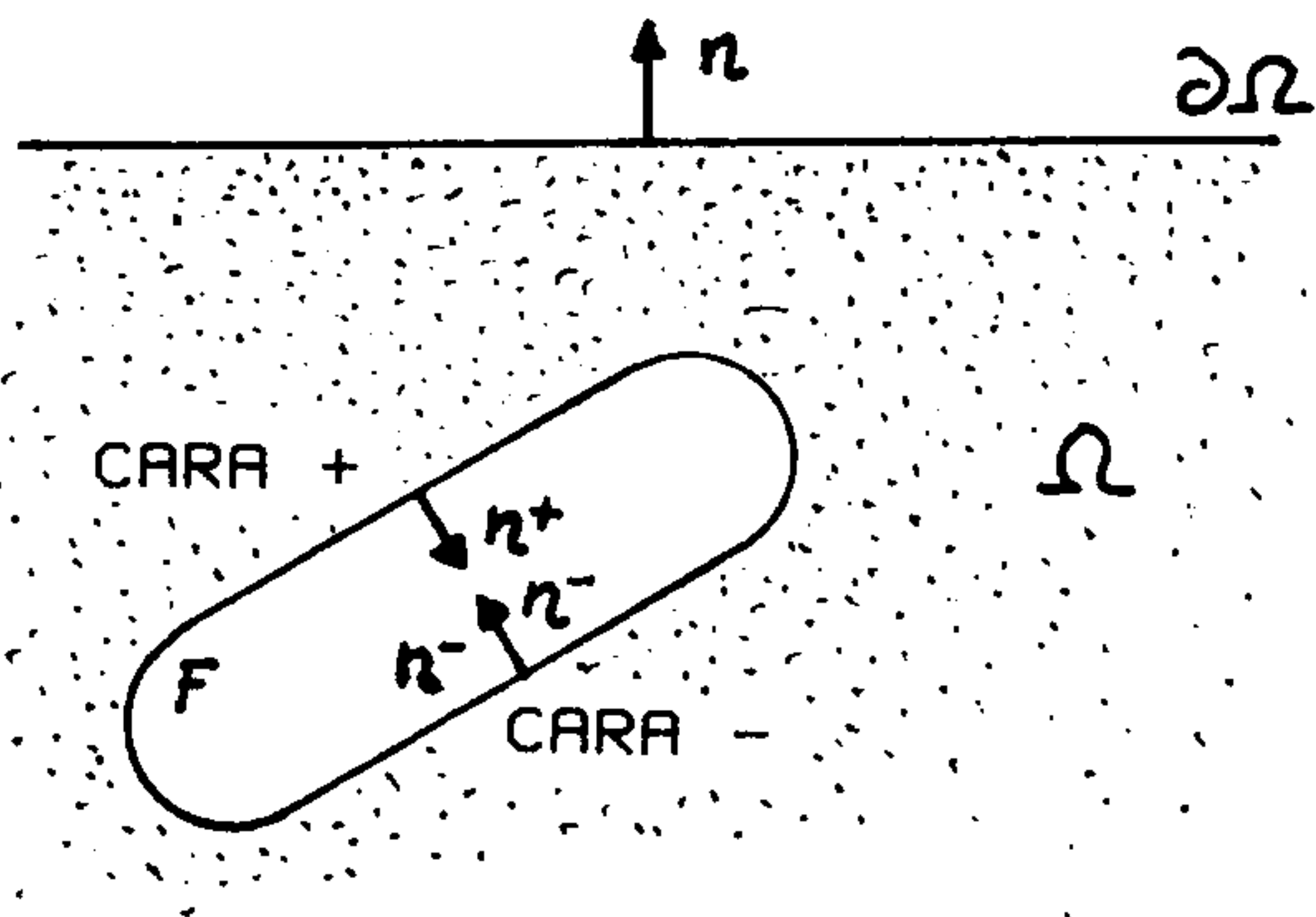


FIGURA 7-A

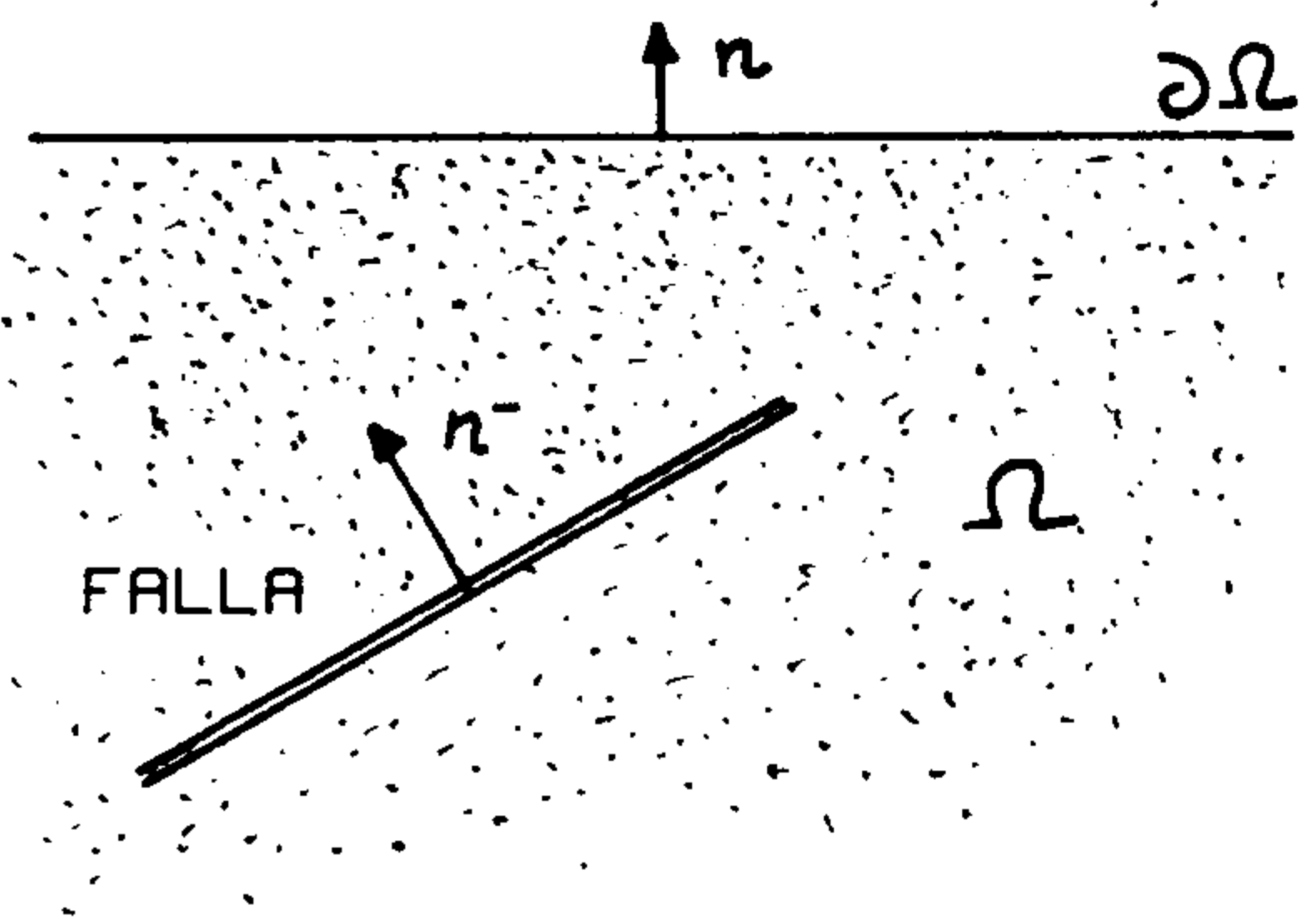


FIGURA 7-B

Si se considera el caso de una falla, en el que la "cara⁺" y "cara⁻" del hueco representado en la figura 1 coinciden (ver figura 7-B), el último término del segundo miembro de la ecuación (21) se anula al ser los valores de $t(Q)$ iguales y de sentido contrario, pudiéndose escribir dicha ecuación de la forma:

$$\begin{aligned} C \bar{u}(P) + \int_{\partial\Omega} \bar{u}(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q &= \\ &= \int_{\partial\Omega} \bar{t}(Q) \bar{U}(P, Q) dS_Q - \int_F \bar{u}(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q \end{aligned} \quad (22)$$

Pero el último término del segundo miembro de esta ecuación (22) es:

$$\begin{aligned} - \int_F \bar{u}(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q &= - \int_{\text{Falla}} \bar{u}^+(Q) \bar{T}^+(P, Q) dS_Q - \\ &- \int_{\text{Falla}} \bar{u}^-(Q) \bar{T}^-(P, Q) dS_Q \end{aligned} \quad (23)$$

en la que se han representado con superíndice positivo los valores correspondientes a la denominada "cara⁺", con superíndice negativo los valores correspondientes a la denominada -

"cara -", y en la que las integrales están extendidas a la superficie de cada una de estas caras, que es igual y se ha indicado con "Falla" en la expresión (23).

Ahora bien, al ser:

$$\begin{aligned}\bar{T}^+ &= \sigma n^+ \\ \bar{T}^- &= \sigma n^-\end{aligned}\tag{24}$$

Si tal y como se indica en la figura 7-B, se toma como normal única de la falla la correspondiente a la "cara -", teniendo en cuenta (24) y que ambas normales tienen signos opuestos, se tiene:

$$-\bar{T}^+ = \bar{T}^- = \bar{T}\tag{25}$$

que al ser sustituido en (23) conduce a un valor por dicha integral:

$$\begin{aligned}- \int_F \bar{u}(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q &= \int_{\text{Falla}} \bar{u}^+(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q - \\ - \int_{\text{Falla}} \bar{u}^-(Q) \bar{T}(P, Q) dS_Q &= \int_{\text{Falla}} \bar{T}(P, Q) (\bar{u}^+(Q) - \bar{u}^-(Q)) dS_Q = \\ &= \int_{\text{Falla}} \bar{T}(P, Q) \Delta u(Q) dS_Q\end{aligned}\tag{26}$$

en la que $\Delta u(Q)$ representa el salto de desplazamiento producido entre las caras de la falla, dato en el problema, por lo que es conocido el valor de la integral (26) y es posible mantener para este caso la formulación general sin más que añadir al vector de cargas los valores de dicha integral, tal y como puede verse en (22).

6. DETALLES COMPUTACIONALES

En este trabajo, se han implementado elementos triangulares y rectangulares para la discretización del contorno, sobre los que se considera constante el valor de las variables de campo y asociado a su baricentro.

El organigrama básico del programa realizado se indica a continuación.

ENTRADA DE DATOS
DEFINICION DE LA EXCITACION
PARA CADA FRECUENCIA
GENERACION AUTOMATICA DE LA MALLA PARA CADA FRECUENCIA
EVALUACION DE LOS COEFICIENTES INTEGRALES (MATRICES A y B)
APLICACION DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO
RESOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES
VECTORES DE RESULTADOS Y, SI SE DESEA, RESOLUCION PUNTOS INTERNOS.
SALIDA DE RESULTADOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA
INTERPOLACION VALORES INTERMEDIOS DE LA FRECUENCIA
IFFT DE LA RESPUESTA
SALIDA DE RESULTADOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Al ser uno de los puntos clave del método el cálculo de los coeficientes de influencia, señalaremos que en el caso de que el punto de colocación no pertenezca al elemento sobre el que se realiza la integración, esta se realiza numéricamente - utilizando siete puntos para los triangulares y nueve para los rectangulares.

En el caso de que el punto de colocación pertenezca al elemento sobre el que se integra, se descompone el elemento en triángulos (con un vértice en el baricentro y lado opuesto ca-

da uno de los del elemento) y se suman posteriormente los valores obtenidos al integrar sobre cada uno de ellos. Para evaluar estas últimas integrales, se recurre a un artificio basado en la identidad del tipo de singularidad entre las soluciones estática y dinámica. Para ello, se realiza una integración numérica, con nueve puntos, de la diferencia entre las soluciones estática y dinámica, sumando posteriormente el valor obtenido por integración analítica de la solución estática.

7. CONCLUSIONES

Probablemente el aspecto más destacable del trabajo sea - la demostración de la facilidad con que el método puede ser - programado como una subrutina más en un código general de elementos de contorno.

Respecto a la "calidad" de los resultados obtenidos dependen, naturalmente, de la discretización empleada. En la actualidad se está procediendo a una serie sistemática de pruebas, una de las cuales consiste en la simulación de un estrato horizontal. Para ello se modeliza una falla horizontal a una profundidad determinada, se impone un movimiento de amplitud unidad en una gama de frecuencias y se recoge el desplazamiento - en la superficie libre.

Los resultados obtenidos en esta prueba son esperanzadores, en el sentido de permitir una buena aproximación con sistemas de tamaño reducido.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo suministrado por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica (C.A.Y.C.I.T.) y por el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la Cooperación Científica y Tecnológica.

9. REFERENCIAS

1. ABASCAL, R. (1984)
Estudio de problemas dinámicos en interacción suelo-estructura por el Método de los Elementos de Contorno.
Tesis Doctoral. E.T.S.I.I. Sevilla.
2. ALARCON, E., DOMINGUEZ, J. (1982)
El M.E.C. en problemas dinámicos.
Rec. de com. pres. en el 1^{er} Simposium Nacional sobre aplicación del método de los elementos finitos en ingeniería.
V-1.
3. BENITO, J.J. (1985)
Interacción dinámica terreno-estructura. Aplicación a Centrales Nucleares.
Tesis Doctoral. E.T.S.I.I. U.P. Madrid.
4. CANO, J.J. (1985)
Cálculo de impedancias dinámicas en zapatas circulares rígidas en terrenos estratificados con amortiguamiento histérico.
Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.
5. CANO, J., DOMINGUEZ, J., ALARCON, E., BENITO, J.J. (1985)
Interacción dinámica terreno-estructura en estructuras OFF-SMORE.
1^{er} Congreso Iberoamericano de Métodos Computacionales en Ingeniería, V-3. Madrid.
6. CRUSE, T.A., RIZZO, F. (1968)
A direct formulation and numerical solution of the general transient elastodynamics problem I.
Journ. of Mathematical Analysis and Appl. 22, 244-259.
7. DOMINGUEZ, J. (1978)
Dynamic stiffness of rectangular foundations.
M.I.T. Res. Report R78-20, Dep. Civ. Eng.

8. DOMINGUEZ, J., ALARCON, E. (1982)
The Boundary Element Method in Elastodynamics.
10th Imacs World Congress. Montreal.
9. UDIAS, A., MUÑOZ, D., BUFORN, E. (1985)
Mecanismo de los Terremotos y Tectónica.
Editorial de la Universidad Complutense de Madrid.
10. WOLF, J.P. (1985)
Dynamic Soil-Structure Interaction.
Prentice-Hall.